

Motor de inducción de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor

Damaris Larixa Angel Cepeda y Pedro Jesús Granados Rangel

Trabajo presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Electricista

Director:

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado a mis padres Libardo Angel Soler y María del Carmen Cepeda quienes me apoyaron durante toda mi carrera profesional.

A mi hermano Carlos Hernando Angel quien, con su apoyo incondicional, motivación y ejemplo a seguir hizo gran parte de este proceso.

A mi hermana Alejandra Angel que desde que inicie este proceso con su inocencia me llenaba de cartas, amor y motivación para nunca desfallecer.

A mis abuelos, mis tíos y familia que con sus oraciones constantes hicieron que Dios nunca me desamparara.

A mi amiga Leidy Teatin, que desde la distancia siempre estuvo para mí, escuchándome, motivándome, apoyándome, gracias.

A mis amigos que siempre me apoyaron y me dieron fuerzas para seguir juntos en este proceso.

Damaris Angel Cepeda

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Isidro Granados y Adela Rangel quienes con su amor, paciencia, apoyo incondicional y esfuerzo me han permitido llegar a este momento, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis hermanos Juan Andrés, Tatiana Alexandra e Isaira Xilena por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis compañeros de estudio y amigos especialmente a Santiago Bungereoth, Jersson García, Lizeth Campos, Natalia Rincón, Maximiliano Correa, Felipe Alfonso, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias, siempre los llevo en mi corazón.

Pedro Granados Rangel

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ayudarme, llenarme de sabiduría y entendimiento para poder llegar hasta este momento, por nunca dejarme desfallecer en momentos de dificultad y debilidad.

Doy gracias a mis padres quien siempre confiaron en mí y me dieron su apoyo incondicional hasta este último momento.

Agradezco al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres, quien con su paciencia, disponibilidad, asesoría, atención y entrega hicieron posible la culminación de este trabajo de grado.

A mis compañeros de estudio en especial, a Natalia Ardila, Jerson García, Santiago Bungeroth, Lizeth Campos y Pedro Granados, quien con su amistad y conocimiento hicieron posible la culminación de mi carrera profesional.

Damaris Angel Cepeda

Agradezco a Dios por bendecirme día a día, por guiarme a lo largo de mi vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres: Isidro Granados y Adela Rangel, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Agradezco a mi compañera de tesis, de estudio, mi amiga Damaris Ángel quien me ha acompañado y apoyado a lo largo de nuestra carrera universitaria.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Hermann Raúl Vargas, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Pedro Granados Rangel

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
1.Objetivos.....	15
1.1.Objetivo general.....	15
1.2.Objetivos específicos.....	15
2.Marco teórico.....	16
2.1.Motor de inducción.....	16
2.2.Flujo radial.....	17
2.3.Flujo axial.....	18
2.4.Fluido magnetorreológico.....	19
3 Metodología.....	20
3.1.Modelado de la bobina de 60° en el Software CST STUDIO SUITE.....	20
3.1.1.Diseño de la bobina de 60°.....	20
3.1.2. Modelado núcleo ferromagnético del estator.....	20
3.1.3. Modelado de la bobina de 60°.....	21
3.1.4. Sistema básico de la bobina de campo de 60°.....	21
3.2.Aspectos constructivos del motor de flujo axial.....	22
3.2.1. Diseño del estator bipolar.....	22
3.2.2. Construcción del estator.....	22

3.3.Resultados al simular la bobina de 60° en CST STUDIO SUITE	24
3.4.Elaboración de las bobinas de campo.....	27
3.5.Rotor.....	28
3.5.1.Diseño y elaboración de bucle de material acrílico:	28
3.6.Datos del condensador utilizado	30
3.7.Preparación del fluido magnetorreológico.....	31
3.7.1.Selección de partículas ferromagnéticas	31
3.7.2.Selección del fluido portador	32
3.8.Preparación de las muestras.....	33
3.8.1.Muestra 1:	33
3.8.2.Muestra 2:	33
3.9.Diseño del eje del motor de flujo axial.....	34
3.10.Ensamble final.....	37
3.11.Pruebas al motor de flujo axial	38
3.11.1Alimentación del motor	38
3.11.2. Prueba para observar movimiento del fluido magnetorreológico	39
3.11.3. Muestras nuevas:	39
4.Observaciones y conclusiones	41
Referencias Bibliográficas.....	43
Apéndices	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Resultados obtenidos en la bobina de campo.....	25
Tabla 2 Características del condensador seleccionado	31
Tabla 3 Elementos de medición usados en las pruebas.....	39
Tabla 4 Prueba tensión 10 V.....	40
Tabla 5 Prueba tensión 20 V.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Distribución del bobinado.	16
Figura 2. Distribución de pastillas en el núcleo ferromagnético.	17
Figura 3. Onda resultante rectangular de dos polos pulsantes.	17
Figura 4. Onda de flujo magnético axial.	18
Figura 5. Medio núcleo ferromagnético del estator en CST.	20
Figura 6. Esquema para bobina del estator con ancho de 60°.	21
Figura 7. Modelo completo para las cuatro bobinas con ancho de 60°.	22
Figura 8. Medio núcleo de estator ferromagnético.	23
Figura 9. Despliegue de los devanados para cada cara polar.	26
Figura 10. Coronas del estator completamente bobinadas.	27
Figura 11. Isométrica de la dona realizada en SolidWorks.	29
Figura 12. Vista frontal y lateral de la dona realizada en SolidWorks unidades en cm.	29
Figura 13. Dona en acrílico.	30
Figura 14. Tapones de caucho para los orificios de la dona acrílica.	30
Figura 15. Condensador para desfasar corriente entre devanados.	31
Figura 16. Limadura de hierro.	32
Figura 17. Muestra de ACPM.	32
Figura 18. Muestras del fluido magnetorreológico.	33
Figura 19. Isométrica del eje en SolidWorks.	34
Figura 20. Vista frontal y lateral del eje del motor de flujo axial unidades en cm.	34
Figura 21. Isométrica de la arandela en SolidWorks.	35

Figura 22. Vista frontal y lateral de la arandela unidades en cm.....	35
Figura 23. Isométrica sistema eje y arandelas unido en SolidWorks.....	36
Figura 24. Ensamble final del eje del motor de flujo axial.	36
Figura 25. Despiece del motor de flujo axial empleando SolidWorks.	37
Figura 26. Motor de flujo axial construido.....	37
Figura 27. Esquema de conexión de los devanados del motor.	38

Lista de Apéndices

Apéndice A: Evidencia 1 del funcionamiento del motor de flujo axial. 44

Apéndice B: Evidencia 2 del funcionamiento del motor de flujo axial. 44

Apéndice C: Evidencia 3 del funcionamiento del motor de flujo axial. 44

Resumen

Título: Motor de inducción de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor*.

Autores: Damaris Larixa Angel Cepeda, Pedro Jesús Granados Rangel**

Palabras clave: Fluido magnetorreológico, estator, maquinas eléctricas de inducción, flujo axial.

Descripción:

En este trabajo de grado, se continua la línea de diseño y construcción de máquinas eléctricas que emplean materiales compuestos en sus rotores. El prototipo propuesto genera un flujo magnético que es axial, diferente de los motores de uso común y que son compuestos por piezas mecánicas convencionales radiales. Este motor es bifásico y de dos polos. Su estator es de material ferromagnético y está dividido por doce pastillas divididas uniformemente entre ellas. Para visualizar el movimiento del rotor (ferrofluido), este motor constará de un bucle de material acrílico transparente de sección cuadrada, en forma de dona, el cual contendrá el fluido magnetorreológico. El fluido magnetorreológico se preparará para al menos dos líquidos portantes y diferentes concentraciones de líquido portante y material magnetorreológico. Mediante el uso del software CST Studio Suite, se realiza la simulación de las respectivas bobinas implementadas, con el fin de obtener dichas densidades de los diferentes campos magnéticos obtenidos.

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio con el fin de observar el comportamiento de los dos líquidos portantes y las diferentes concentraciones de fluido magnetorreológico ante diferentes campos magnéticos, se determinó sus respectivos valores de corriente y tensión a los cuales el fluido magnetorreológico genera mayores movimientos dentro del recipiente.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Hermann Raúl Vargas Torres

Abstract

Title: Toroidal prototype with magnetorheological fluid subjected to magnetic fields *.

Authors: Damaris Larixa Angel Cepeda, Pedro Jesús Granados Rangel. **

Key words: Magnetoreological fluid, stator, induction electrical machines, axial flow.

Description:

In this degree work, we continue the line of design and construction of electric machines that use composite materials in their rotors. The proposed prototype generates a magnetic flux that is axial, different from the commonly used motors that are composed of conventional radial mechanical parts. This motor is two-phase and two-pole. Its stator is made of ferromagnetic material and is divided by twelve pads evenly divided among them. To visualize the movement of the rotor (ferrofluid), this motor will consist of a loop of transparent acrylic material of square section, in the shape of a donut, which will contain the magnetorheological fluid. The magnetorheological fluid will be prepared for at least two carrier liquids and different concentrations of carrier liquid and magnetorheological material. By using the CST Studio Suite software, the simulation of the respective implemented coils is performed, in order to obtain such densities of the different magnetic fields obtained.

Laboratory tests were carried out in order to observe the behavior of the two carrier liquids and the different concentrations of magnetorheological fluid before different magnetic fields, determining their respective current and voltage values at which the magnetorheological fluid generates greater movements inside the vessel.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, electronics and telecommunications director Hermann Raúl Vargas Torres.

Introducción

En este trabajo de grado se plantea el diseño y construcción de un estator que genera una onda de flujo magnético axial rotativo. Este flujo magnético inducirá una corriente en un rotor, el cual no es una pieza mecánica convencional, por el contrario, este se compone de un fluido magnetorreológico. El rotor a su vez interactúa con la onda de flujo magnético axial rotativo, haciendo que este rotor tienda a seguir la onda de flujo magnético axial rotativo.

Por tanto, se presenta: 1) El diseño del motor bifásico de flujo axial, 2) Construcción del motor bifásico de flujo axial, 3) el diseño del fluido magnetorreológico para dos líquidos portantes y tres concentraciones de material ferromagnético, 4) Medidas de tensión y corriente correspondientes a todas las pruebas realizadas al prototipo. 5) Ajustes al prototipo.

1. Objetivos

1.1.Objetivo general

Diseñar y construir un motor de inducción de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor.

1.2.Objetivos específicos

- Diseñar el estator bipolar de flujo axial. (Ver pág. 22)
- Diseñar un bucle de material acrílico transparente de sección cuadrada o rectangular. (Ver pág.28)
- Preparar un fluido magnetorreológico. (Ver pág. 31)
- Realizar pruebas de laboratorio. (Ver pág.38)

2. Marco teórico

2.1. Motor de inducción

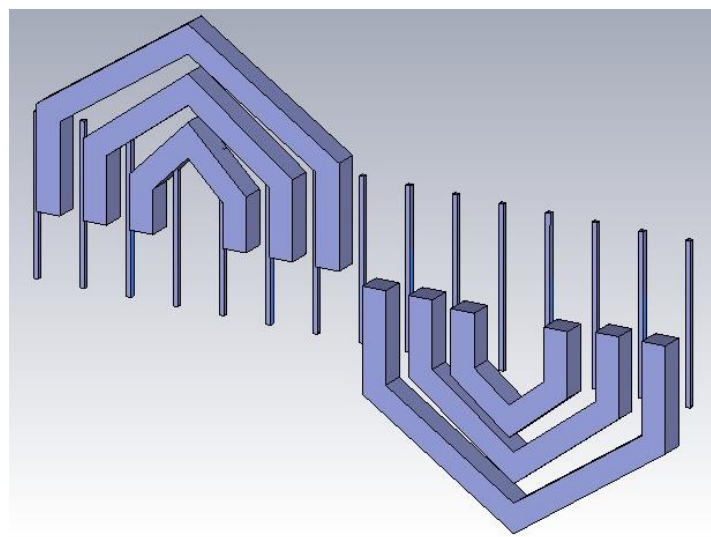
En este trabajo de grado se hablará sobre el motor de inducción de flujo axial, este se diferencia de los motores de inducción convencionales dado que en este caso el campo magnético no gira de forma radial.

Para la realización del modelado del motor, se basó en la teoría de los motores de inducción convencionales, es decir de flujo radial. (Chapman)

El motor empleado en este trabajo de grado es equivalente a un motor bifásico o de fase partida, donde el estator está conformado por dos devanados, uno de estos es el devanado auxiliar o de arranque el cual está conectado a un condensador en serie con el fin de desfasar la corriente 90° con respecto de la del devanado principal, para generar la onda de campo magnético sinusoidal rotatoria que afectará el rotor.

Figura 1.

Distribución del bobinado.

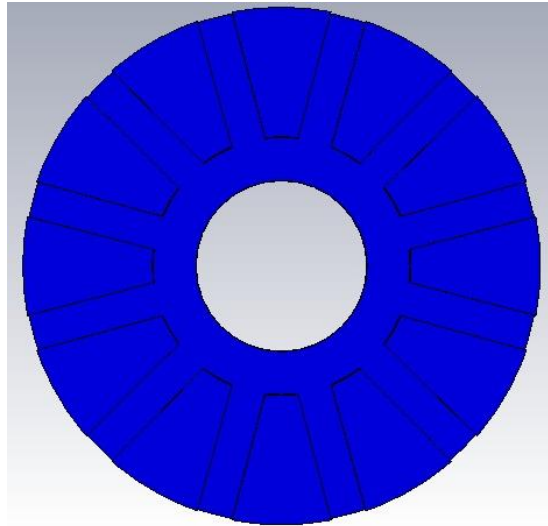


El estator que constituye este motor consta de dos coronas de material ferromagnético,

dicho material se extrajo de una lámina de hierro que posteriormente fue llevada a un taller de torno, distribuida en 12 pastillas con sus medidas específicas. (Ver figura 2)

Figura 2.

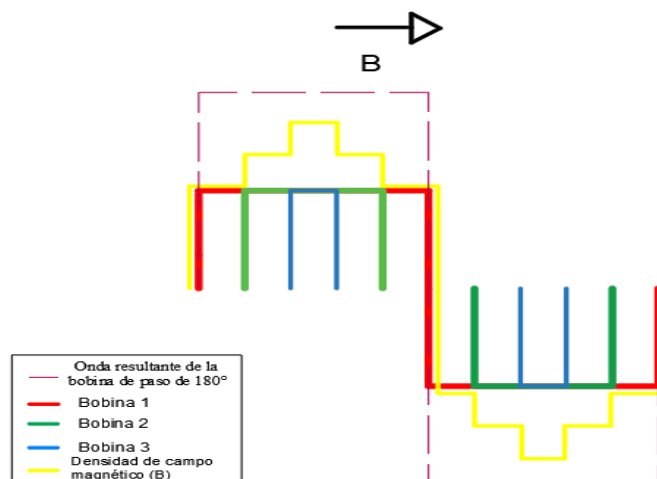
Distribución de pastillas en el núcleo ferromagnético.



2.2. Flujo radial

Figura 3.

Onda resultante rectangular de dos polos pulsantes.



En la figura 3 se observa la representación del bobinado de dos polos de un motor de flujo

magnético radial, teniendo para cada una de las seis bobinas un arrollamiento con el mismo número de vueltas. Además, a través de ellas circula la misma corriente, provocando así, la misma fuerza magnetomotriz y, produciendo una onda de densidad de flujo magnético de forma rectangular o plana.

El devanado se construye de forma distribuida para generar una onda rectangular que se asemeja a una onda sinusoidal. (Ver figura 3)

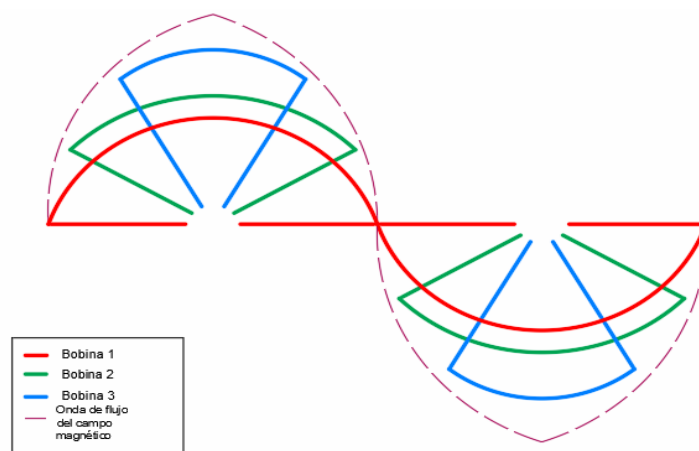
2.3. Flujo axial

A diferencia de un motor del flujo radial, en un motor de flujo axial, el devanado inductor crea un campo magnético paralelo al eje de giro rotórico. Este estator es relativamente práctico de bobinar puesto que se encuentra abierto y plano.

La generación de la onda de flujo magnético axial se describirá partiendo de cómo se genera la onda de flujo magnético radial. Para generar la onda de flujo magnético axial se ubican los lados de bobina de forma colineal, provocando así, que la forma de los cabezales se asemeja a media circunferencia. (Ver figura 4)

Figura 4.

Onda de flujo magnético axial.



Mediante esto se obtiene la cara de un polo y se complementa con la cara del otro polo con polaridad magnética diferente. Con el fin de realizar la onda espacial giratoria se realiza el mismo procedimiento, teniendo presente que físicamente deben girar a 90° . Además, para generar la onda espacial rotativa debido a no disponer de una fuente bifásica, se utiliza un condensador en serie con uno de los devanados.

En este trabajo de grado el rotor presenta su movimiento giratorio entre dos coronas del estator magnéticamente activos, que crean el campo magnético y poseen las superficies polares.

2.4. Fluido magnetorreológico

Un fluido magnetorreológico es un líquido constituido por partículas ferromagnéticas dispersas. Estas partículas se mezclan con el campo magnético externo aplicado, se magnetizan y se alinean hasta formar cadenas cuyo movimiento consiste en seguir las líneas de la onda de campo magnético rotativo.

Los fluidos magnetorreológicos en comparación con los ferrofluidos presentan partículas magnéticas de tamaño micro y nano.

El material magnetorreológico que se empleó para la elaboración del fluido fue limadura de hierro fina, la cual se obtiene de los restos producto de la manipulación del núcleo ferromagnético empleado en este trabajo de grado. Para la elaboración de un buen fluido magnetorreológico se debe tener en cuenta: tamaño, cantidad a utilizar, fluido portador, comportamiento térmico y viscosidad.

En este trabajo de grado se empleó limadura de hierro como partícula magnética que es atraída por campos magnéticos débiles, y como fluido portador se utilizó ACPM debido a su baja viscosidad.

3. Metodología

La metodología empleada en este trabajo de grado es la siguiente:

3.1. Modelado de la bobina de 60° en el Software CST STUDIO SUITE

Para obtener las densidades del campo magnético en la bobina se realiza la simulación en el software CST STUDIO SUITE. Se modela esta bobina porque sirve de base para calcular las demás bobinas.

3.1.1. *Diseño de la bobina de 60°*

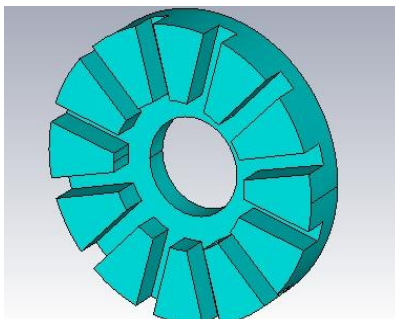
Para diseñar la bobina se tuvo en cuenta el número de vueltas por bobina, el calibre del conductor, dimensiones de la corona de estator.

3.1.2. *Modelado núcleo ferromagnético del estator*

Se realizó el croquis del medio núcleo ferromagnético del estator en el software CST STUDIO SUITE. (Ver figura 5)

Figura 5.

Medio núcleo ferromagnético del estator en CST.

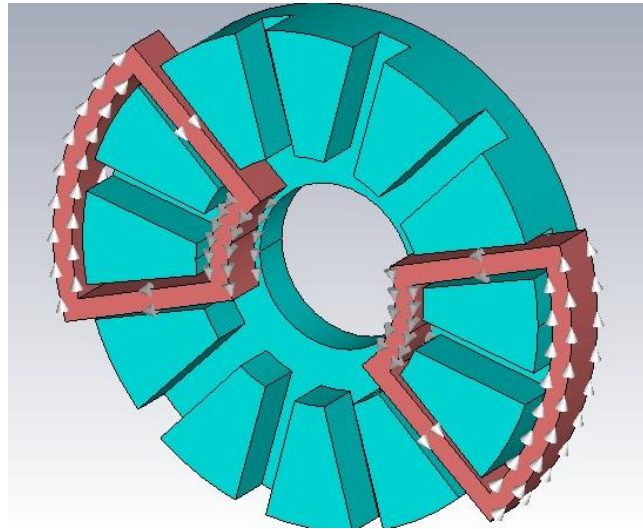


3.1.3. Modelado de la bobina de 60°

Teniendo las dimensiones exactas de la bobina de 60° se procede a realizar la trayectoria cerrada sobre una parte correspondiente del núcleo ferromagnético. Mediante la herramienta *Coil* del software CST STUDIO SUITE se realizó el grupo de bobinas, gracias a esto se obtuvo el modelado total de la bobina de campo.

Figura 6.

Esquema para bobina del estator con ancho de 60°.

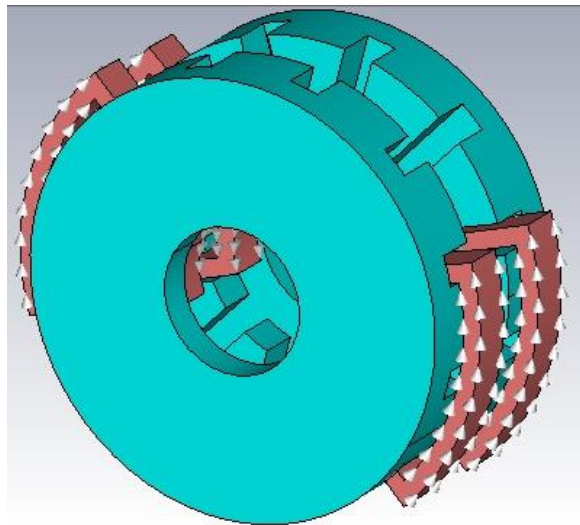


3.1.4. Sistema básico de la bobina de campo de 60°

Las bobinas de 60° están enfrentadas con el fin de obtener una trayectoria magnética cerrada, además, la dirección de las corrientes que circulan por las bobinas de cada una de las coronas del estator, están ajustadas de tal forma que en una el campo magnético entre y en la otra salga. (Ver figura 7)

Figura 7.

Modelo completo para las cuatro bobinas con ancho de 60°.

**3.2. Aspectos constructivos del motor de flujo axial****3.2.1. Diseño del estator bipolar**

Para diseñar el estator bipolar del motor de flujo axial se empleó el Software SolidWorks, en el cual se elaboró con sus medidas correspondientes, además se requieren dos coronas de estator (Ver figura 5).

3.2.2. Construcción del estator

El estator es la parte fija del motor, en este componente estático se encuentran las bobinas que inducen el campo magnético.

Para la construcción del estator se dividió en dos coronas cada una con las mismas dimensiones, con un diámetro exterior de 12 cm y un cilindro hueco de diámetro interno de 4 cm. Cada una de las coronas del estator son de hierro, que funciona como material ferromagnético, así

mismo estas coronas están compuestas por 12 pastillas del mismo material con un espacio de 6 mm entre cada una. (Ver figura 8)

Figura 8.

Medio núcleo de estator ferromagnético.



Para la construcción de las bobinas de cada núcleo fue necesario saber el número de vueltas correspondientes, para el cálculo se empleó la herramienta Matlab, usando las siguientes formulas:

$$Area = \pi * \frac{(re^2 - ri^2)}{360} \frac{1}{angulo} \quad (1)$$

$$R = l * \frac{\mu_o}{area} * fg \quad (2)$$

$$N = B * area * \frac{R}{ib} \quad (3)$$

Donde:

$\mu_o = \pi * 4e-7$; Permeabilidad magnética

$fg = 0,1$ [m], factor del entrehierro debido al particulado del material ferromagnético

$B = 0,1$ [T]; Densidad del flujo magnético

$l = 2/100$ [m]; longitud

$r_e = 6/100$ [m]; radio exterior del núcleo

$r_i = 3/100$ [m]; radio interior del núcleo

Angulo = 60° ;

$i_b = 4,3$ [A]; corriente máxima que soporta

Área [m^2]=Área del núcleo ferromagnético para ese ángulo barrido

$R [A_v/Weber]$ = Reluctancia del sistema barrido por ese núcleo ferromagnético y

% se desprecia la reluctancia del material ferromagnético

N = número de vueltas

De los cálculos anteriormente realizados se aproximó y buscando la simetría total a un total de 40 vueltas para cada una de las bobinas, usando el alambre tipo esmaltado de cobre calibre AWG # 21. Cada cara polar está conformada por 20 espiras, además existe un despliegue de los devanados para cada cara polar, esto se repite una vez para el otro polo y otras dos veces para los polos ubicados a 90° .

3.3. Resultados al simular la bobina de 60° en CST STUDIO SUITE

De la simulación se obtuvo los siguientes valores de densidades de campo magnético.

Tabla 1*Resultados obtenidos en la bobina de campo*

Corrientes	Densidad de campo magnético en CST [T]
4,3	0,02325
3,9	0,02109
3,5	0,01892
3,1	0,01676
2,7	0,01460
2,3	0,01244
1,9	0,01027
1,5	0,00811

Nota. Datos obtenidos de la simulación en el software CST STUDIO SUITE.

La bobina distribuida para una cara polar corresponde a la formada por las subbobinas de color negro, verde y celeste que cubren, 180°, 120° y 60° respectivamente (Ver figura 9), conectadas en serie y siguiendo la misma dirección para el flujo.

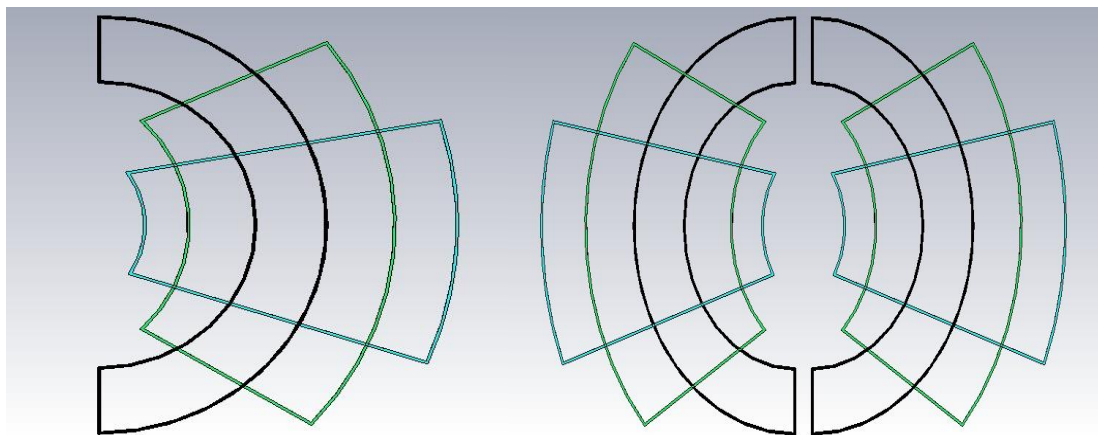
Figura 9.

Despliegue de los devanados para cada cara polar.

a) Despliegue del devanado para un polo

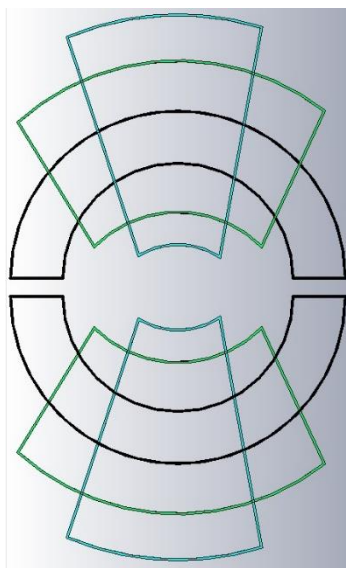
b) Despliegue del devanado a 0°

c) Despliegue del devanado a 90°



a)

b)



c)

En la figura 10 se muestra el estator debidamente bobinado.

Figura 10.

Coronas del estator completamente bobinadas.



Asimismo, este motor es bifásico y de dos polos, los devanados están constituidos por seis bobinas para cada cara polar, para un total de 12 bobinas por corona, además, cuenta con 12 ranuras cada una con una separación de 30° entre ellas, donde cada bobina está formada por 20 espiras. Para la operación del motor se le conecta un condensador en serie con el devanado auxiliar.

3.4. Elaboración de las bobinas de campo

Para la elaboración de las bobinas (Ver figura 10), bobina distribuida y con devanado tipo concéntrico, se utilizó papel aislante entre cada pastilla del estator, con el fin de que el alambre no toque el hierro, el alambre es llevado a una prensa en donde se toma la medida a la bobina que va en el estator, luego de que el estator esté aislado, se ubican las bobinas a 60° , 120° y 180° respectivamente en cada corona del estator, de igual manera para poder sostener las bobinas y que no se salgan se usaron cuñas de madera y amarres plásticos.

Asimismo, para los respectivos empalmes y salidas para la conexión se emplearon

espaguetis para los alambres y empalmes para aislar. Después se procedió a empalmar los cables de salida negros, verdes y rojos que se utilizaron para realizar la conexión interna de las bobinas.

(Ver figura 10)

Estas bobinas en cada cara polar están conectadas en serie, de tal forma que si el campo magnético en una cara polar entra en la otra cara polar el campo magnético debe salir, con el fin de generar el movimiento y funcionamiento del motor. Las corrientes en alterna que circulan dan origen a ondas de campo magnético pulsantes. Este mismo procedimiento se repite para la otra cara polar y para las bobinas que están dispuestas físicamente desplazadas 90° .

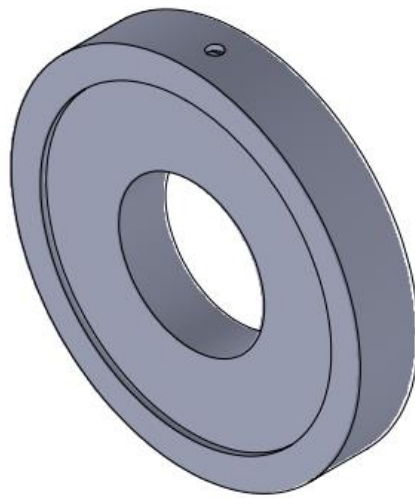
3.5. Rotor:

3.5.1. Diseño y elaboración de bucle de material acrílico:

Para la elaboración del recipiente, se realizó el diseño en SolidWorks (Ver figura 11). Se empleó material acrílico transparente de grosor de 4 mm con el fin de poder observar el comportamiento del fluido magnetorreológico ante la presencia de campo magnético, esta dona acrílica tiene un diámetro exterior de 12 cm y un diámetro interior de 2,5 cm para poder encajar con el eje perfectamente. Esta dona cuenta con dos huecos cada uno ubicados a 180° , donde se puede llenar o vaciar de fluido magnetorreológico.

Figura 11.

Isométrica de la dona realizada en SolidWorks.

**Figura 12.**

Vista frontal y lateral de la dona realizada en SolidWorks unidades en cm

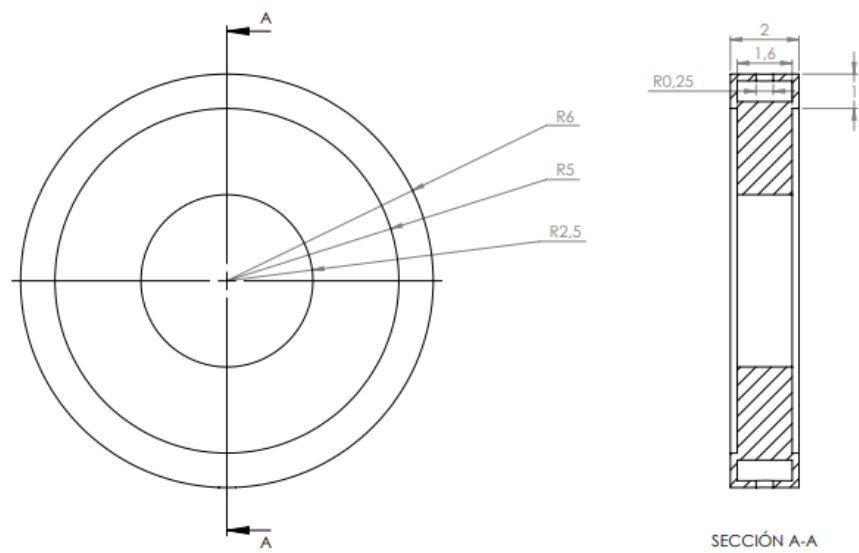


Figura 13.

Dona en acrílico.

**Figura 14.**

Tapones de caucho para los orificios de la dona acrílica.



3.6.Datos del condensador utilizado

Se requiere de un condensador de corriente alterna con el fin de desfasar la corriente 90° para obtener la condición de par máximo del motor y generar el arranque. De acuerdo a estas necesidades (Ver figura 15) se muestra el condensador y sus respectivas características en la Tabla 2.

Tabla 2

Características del condensador seleccionado

<i>Marca: NGM</i>	<i>Tensión de alimentación: 250 V</i>
<i>Frecuencia: 60 Hz</i>	<i>Capacitancia: 590-708 μF</i>

Nota. Datos obtenidos del condensador seleccionado.

Figura 15.

Condensador para desfasar corriente entre devanados.



3.7. Preparación del fluido magnetorreológico

Siguiendo los pasos mencionados anteriormente, para obtener el fluido magnetorreológico se requiere de partículas magnéticas y el fluido portador.

3.7.1. Selección de partículas ferromagnéticas

Como partícula ferromagnética se empleó el ripo o limadura de hierro directamente del material ferromagnético empleado para la construcción del núcleo ferromagnético del estator. (Ver figura

16)

Figura 16.

Limadura de hierro.



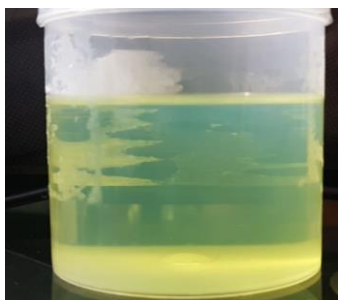
Para la obtención de este, se empleó una cabina extractora y se utilizaron los dispositivos de seguridad correspondientes. La cantidad de limadura de hierro se seleccionó de acuerdo con las necesidades presentes en este trabajo de grado.

3.7.2. Selección del fluido portador

En la actualidad se cuenta con diferentes aceites de hidrocarburos con facilidad para obtenerlos comercialmente, además estos se emplean para la fabricación de los fluidos magnetorreológicos. De acuerdo a las propiedades de los aceites conocidos se empleó ACPM (Ver figura 17). Este fluido es comúnmente usado y se seleccionó debido a su baja viscosidad y color claro o transparente.

Figura 17.

Muestra de ACPM.



3.8. Preparación de las muestras

Para la realización de las pruebas experimentales del motor de este trabajo de grado, se dispone de dos concentraciones diferentes, que corresponden al 1% y 10% del volumen de la limadura de hierro. El valor base del volumen de la limadura de hierro corresponde a 5 ml.

Las muestras elaboradas son las siguientes:

3.8.1. *Muestra 1:*

1% (0,05 ml) de material magnético y 99% (4,95 ml) de ACPM

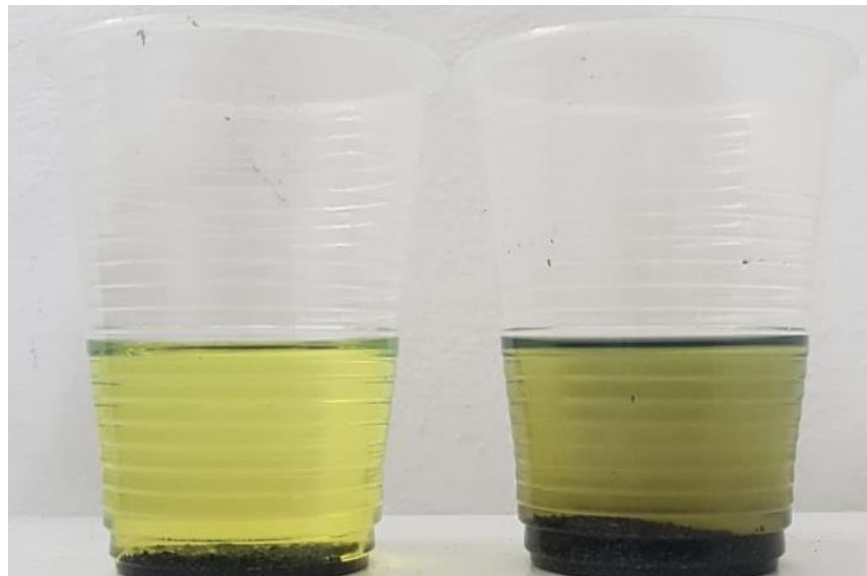
3.8.2. *Muestra 2:*

10% (0,5 ml) de material magnético y 90% (4,5 ml) de ACPM

Cada una de las concentraciones se almacenaron y separaron para luego usarlas adecuadamente en las respectivas pruebas al motor. (Ver figura 18)

Figura 18.

Muestras del fluido magnetorreológico.



En la Figura 18 se observan de derecha a izquierda las muestras 1 y 2 respectivamente.

3.9. Diseño del eje del motor de flujo axial

Para el diseño del eje del motor se utilizó la herramienta SolidWorks, de forma cilindra cuyo diámetro es de 2,5 cm y con un hueco interior de 1 cm que es donde enrosca los tornillos que sujetan el motor. (Ver figura 19)

Figura 19.

Isométrica del eje en SolidWorks.

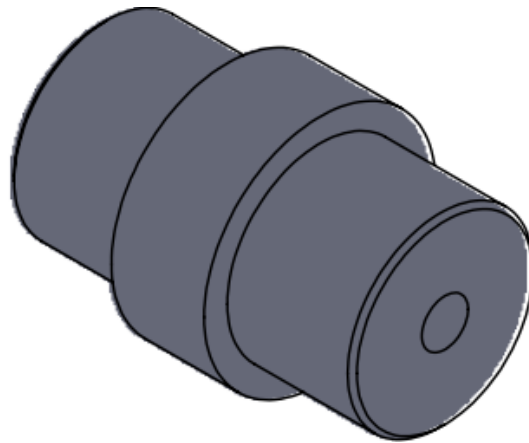
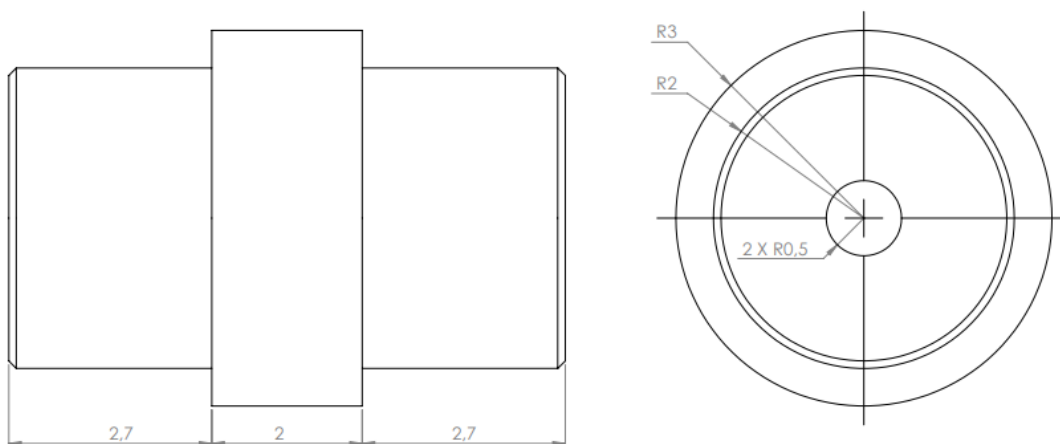


Figura 20.

Vista frontal y lateral del eje del motor de flujo axial unidades en cm.



Nota:
Chafan de 0,1 en los extremos del eje
Hueco para tornillo de R0,5 - profundidad de 1

De igual manera se diseñaron los tornillos y arandelas para enroscar y sujetar el motor completamente.

Figura 21.

Isométrica de la arandela en SolidWorks.

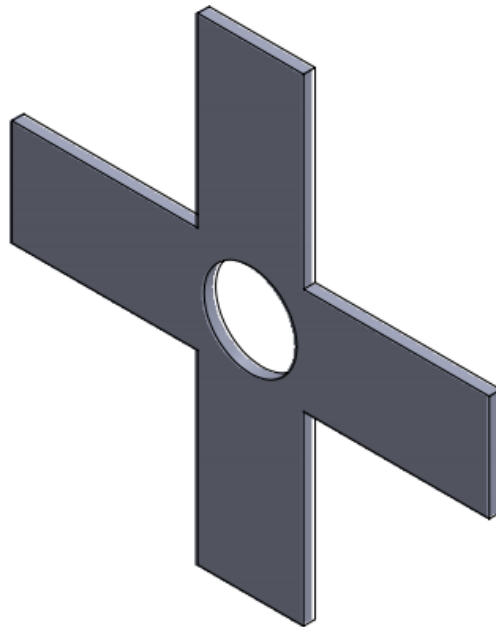


Figura 22.

Vista frontal y lateral de la arandela unidades en cm.

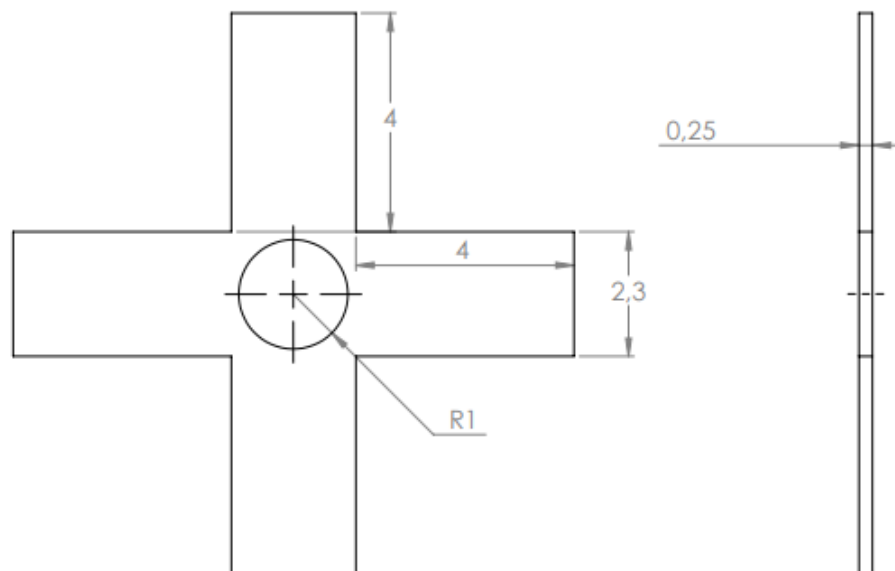
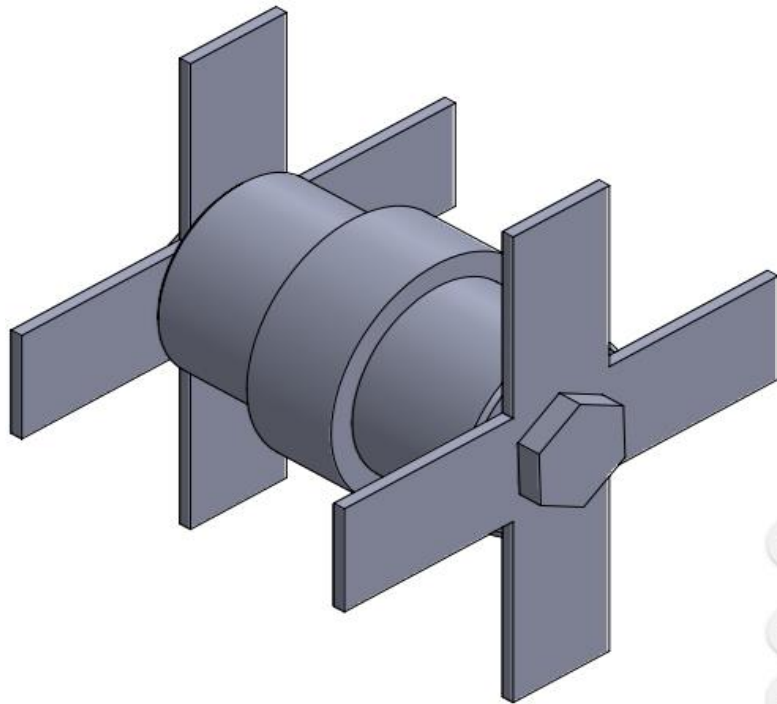


Figura 23.

Isométrica sistema eje y arandelas unido en SolidWorks.



Después de tener el diseño se realizó el eje en hierro. (Ver figura 24)

Figura 24.

Ensamble final del eje del motor de flujo axial.



3.10. Ensamble final

Teniendo ya todos los elementos y partes del motor de flujo axial, se prosigue a realizar el ensamble de cada uno de los elementos que lo componen. (Ver figura 26)

Figura 25.

Despiece del motor de flujo axial empleando SolidWorks.

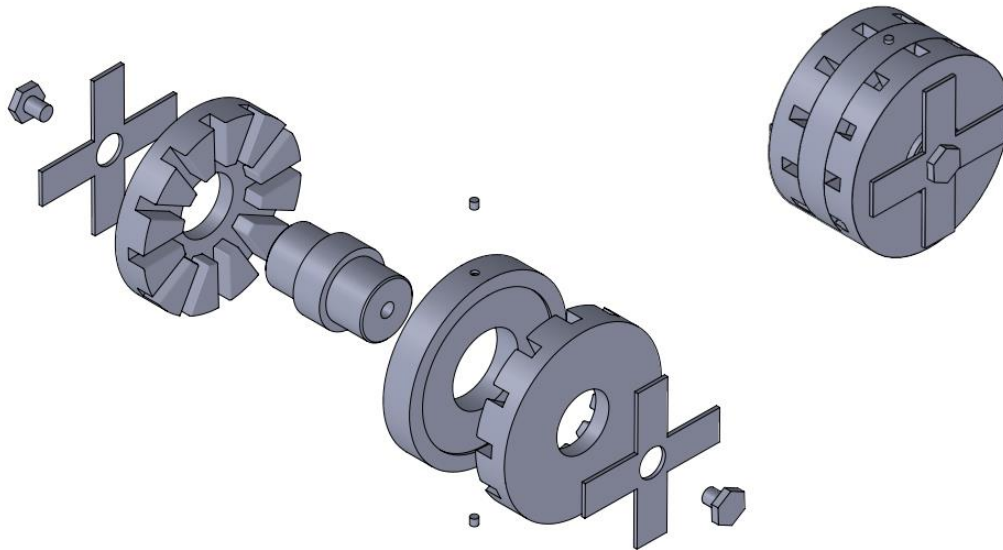


Figura 26.

Motor de flujo axial construido.



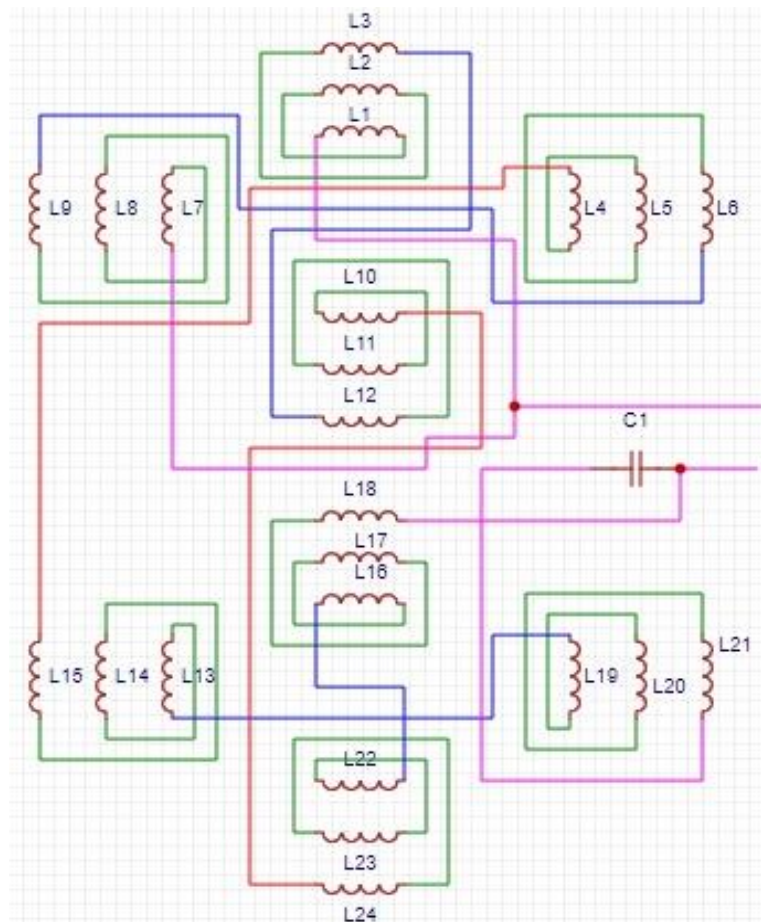
3.11. Pruebas al motor de flujo axial

3.11.1. Alimentación del motor

Cada una de las bobinas del estator se conectan en serie, al energizar se van formando campos magnéticos de forma rotativa, de igual manera permite la circulación de corrientes necesarias y una corriente de arranque producida por la conexión de un condensador en serie obteniendo un desfase de 90° eléctricos generando el campo magnético giratorio cuyo fin es provocar que las partículas magnéticas que se encuentran dentro de la dona acrílica giren. (Ver figura 27)

Figura 27.

Esquema de conexión de los devanados del motor.



Para la realización de las pruebas correspondiente se registraron los instrumentos en la Tabla 3.

Tabla 3

Elementos de medición usados en las pruebas

Equipo	Medida	Rango	Resolución	Incertidumbre
Pinza Amperométrica	Corriente AC	60 A	0,01 V	$\pm 1,8+5\% +3$

Nota. Datos obtenidos de la pinza Amperométrica usada.

Para energizar el motor y ponerlo en marcha se utilizó un transformador entrada de 110 V y salida de 10/20 V.

3.11.2. Prueba para observar movimiento del fluido magnetorreológico

Se ejecutaron pruebas al motor con las muestras 1 y 2 mencionadas anteriormente. Además, de estas pruebas se realizaron otras con diferente concentración de fluido con el fin de obtener una mejor apreciación del funcionamiento del motor.

3.11.3. Muestras nuevas:

Muestra 3: 5% (0,25 ml) de material magnético y 95% (4,75 ml) de ACPM

Muestra 4: 15% (0,75 ml) de material magnético y 85% (4,25 ml) de ACPM

Muestra 5: 25% (1,25 ml) de material magnético y 75% (3,75 ml) de ACPM

Tabla 4*Prueba tensión 10 V*

Muestra	Tensión [V]	Corriente [A]
Muestra 1	10	3,5
Muestra 2	10	3,6
Muestra 3	10	3,55
Muestra 4	10	3,65
Muestra 5	10	3,6

Nota. Datos obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo con tensión de 10 V.

Tabla 5*Prueba de tensión 20 V*

Muestra	Tensión [V]	Corriente [A]
Muestra 1	10	3,5
Muestra 2	10	3,6
Muestra 3	10	3,55
Muestra 4	10	3,65
Muestra 5	10	3,6

Nota. Datos obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo con tensión de 20 V.

Luego de realizar cada una de las pruebas para cada muestra, se observó que la muestra o concentración que mejor genera el movimiento giratorio del fluido magnetorreológico es la muestra 1, ya que, al energizar el motor se observan que las partículas magnéticas giran hacia un mismo sentido, mostrando con claridad el movimiento y funcionamiento del motor.

Además, se observó que, si la cantidad de limadura de hierro que se le agrega al fluido es mayor, este tiende a moverse menos.

Al tomar como concentración limadura de hierro más fina, es decir, casi polvo, se obtiene una mejor observación del fluido debido a que gira más fácilmente.

4. Observaciones y conclusiones

En este trabajo de grado se llevó a cabo lo propuesto en los objetivos, se lograron los resultados esperados, y, por tanto, se concluye:

Se tuvo acceso a un taller donde solo se contaba con medición de tensión y corriente. Como fuente de tensión en el taller se tuvo un transformador el cual presentaba tensiones de 10, 20 y 40 V. Este trabajo de grado se tuvo que adaptar a las circunstancias puesto, que, no se contó con los recursos del laboratorio de máquinas eléctricas de la UIS. El hecho de tener tensiones y corrientes hace que se obtenga una reactancia, pero solo se puede hablar de la magnitud de la reactancia, más no de ángulo.

Con el recurso tecnológico CST STUDIO SUITE se realizaron simulaciones de cuatro de las bobinas, las cuales corresponden a la bobina de 60° de cada cara polar, con el propósito de apreciar los valores de las densidades de campo de flujo magnético en el núcleo ferromagnético del estator.

Con las pruebas realizadas a las concentraciones 1 y 2, se obtuvo el movimiento giratorio esperado del fluido magnetorreológico dentro del recipiente que gracias a su material acrílico y transparente se pudo apreciar dicho comportamiento.

Al aumentar la concentración del particulado ferromagnético el motor presenta dificultad

para moverlo, ya que es mayor la cantidad del particulado ferromagnético.

Para una mejor observación del comportamiento del fluido se recomienda utilizar bajas concentraciones de particulado ferromagnético, esto con el fin que no requiera de un campo magnético muy grande.

Para futuros desarrollos se propone diseñar y construir un motor trifásico de flujo axial.

Referencias Bibliográficas

Chapman, S. J. (s.f.). Máquinas Eléctricas. México: Mc Graw Hill.

Guru, B. S., & Hizioglu, H. R. (s.f.). Máquinas Eléctricas y Transformadores. México: Alfa
Omega Grupo Editor.

Fraile Mora, J. (s.f.). Máquinas Eléctricas. España: Mc Graw Hill.

Apéndices

Apéndice A: Evidencia 1 del funcionamiento del motor de flujo axial.

<https://youtu.be/5mVDZXy3tcg>

Apéndice B: Evidencia 2 del funcionamiento del motor de flujo axial.

https://youtu.be/5880Zyvdr_4

Apéndice C: Evidencia 3 del funcionamiento del motor de flujo axial.

<https://youtu.be/DOtDL2bxvIA>